

Einfluss von konkurrierenden Kerben an thermischen Schnittkanten auf die Qualität der Oberfläche sowie deren Schwingfestigkeit

P. Diekhoff, Th. Nitschke-Pagel und K. Dilger,

Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig

p.diekhoff@tu-braunschweig.de

Abstract

Die Materialermüdung ist neben Korrosion und Verschleiß ein elementares Versagensverhalten in Stahlkonstruktionen. Konstruktionsvorschriften empfehlen eine Nachbehandlung der rissempfindlichen Schweißnähte, um die Qualität und deren Schwingfestigkeit lokal zu erhöhen. In Folge dessen gewinnen unverschweißte Bauteilbereiche als potentielle Rissausgangsorte hinsichtlich der Schwingfestigkeit zunehmend an technischer und wirtschaftlicher Relevanz. Insbesondere thermische Schnittkanten müssen dabei genauer betrachtet werden. Der Einsatz von unterschiedlichen Schneidverfahren in der metallverarbeitenden Industrie ist weit verbreitet und es kommt zu unterschiedlichen Schnittflächenqualitäten. Neben den Einflüssen durch den Wärmeeintrag während des Schneidprozesses und der Vorschubgeschwindigkeit kann es dabei durch ungünstige Umgebungsbedingungen zur Prozessunterbrechung und zu ungewollten Einschnitten in die zu trennende Bauteilgeometrie kommen. Dies führt zu fehlerhaften Bauteilen und zu Ausschuss, da Reparaturschweißungen in einigen Industriebereichen nicht zulässig sind.

In diesem Beitrag werden Schwingfestigkeitsergebnisse von 20 mm dicken brenngasgeschnittenen Schulterproben aus S355N sowie S690Q vorgestellt, die zum einen fehlerfrei sind und zum anderen nach Prozessunterbrechung reparaturgeschweißt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingfestigkeit von gekerbten und beschädigten Schnittkanten durch das Reparaturschweißen vollständig auf das Niveau fehlerfreier Bauteile angehoben werden kann.

1 Einleitung

Bauteile und Stahlkonstruktionen, die dynamischer Belastung ausgesetzt sind, unterliegen dem Phänomen der Materialermüdung, welches in zahlreichen Anwendungsgebieten auftritt und neben Korrosion und Verschleiß eines der elementaren Versagensursache ist [1,2]. Hervorgerufen wird dies durch die Rissbildung und anschließenden Fortschritt bis zum vollständigen Bruch des Bauteils. Risse entstehen zumeist an Stellen mit erhöhter Spannungskonzentration wie zum Beispiel an Kerben, Querschnittsänderungen oder Materialfehlern [3]. In der Industrie werden die gewünschten Bauteilformen meist durch thermische Schneidverfahren wie Autogenes Brennschneiden, Plasmaschneiden, Laserstrahlschneiden oder Wasserstrahlschneiden herausgetrennt. Dies resultiert in unterschiedlichen Schnittkantenqualitäten, abhängig von den Prozessparametern der Verfahren, welche die Ermüdungsfestigkeit beeinflusst [4-7].

Durch die stetige Optimierung der kritischen Kerbdetails an Schweißnähten rücken freie Schnittkanten, als potentielle Rissausgangsorte, mehr in den Fokus und müssen bei der Bewertung mit betrachtet werden. Neben den geometrischen und metallurgischen Einflüssen, bedingt durch den Schneidprozess, kann es durch ungünstige Umgebungsbedingungen zur Prozessunterbrechung kommen. Dies resultiert in Einschnitten bzw. Kerben in der Bauteilgeometrie. Neben den Qualitätsanforderungen aus der DIN EN 1090 [8] sowie DIN EN ISO 9013 [9] sind in einigen Industriebereichen zudem Reparaturschweißungen an Schnittkanten nicht zulässig, was zu unerwünschtem Ausschuss und höheren Kosten führt.

In dieser Untersuchung wurden Schwingfestigkeitsversuche an autogenen Brennschnittkanten mit fehlerfreien und reparaturgeschweißten Proben durchgeführt, um den Einfluss von konkurrierenden Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit zu analysieren. Die Versuche wurden bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ bei konstanter Amplitude durchgeführt. Alle Proben wurden hinsichtlich der Härte, Rauheit und Rechtwinkligkeit nach EN 1090 bzw. ISO 9013 charakterisiert.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Werkstoff und Probengeometrie

Zur Untersuchung des Einflusses von reparaturgeschweißten thermischen Schnittkanten auf die Schwingfestigkeit kamen zwei unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz: Ein normalisierend gewalzter Feinkornbaustahl S355N und ein hochfester Vergütungsstahl. Die folgenden Tabellen zeigen die mechanischen Eigenschaften der Materialien, die

chemischen Zusammensetzungen und den Kohlenstoffäquivalenten sowie die verwendeten Schneidparameter, Tab.1-3.

Tab.1: Materialparameter

Material	Streckgrenze R_{eH} [MPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Bruchdehnung [%]
S355N (3 Probenumfang)	372-424	560-570	27-32
S690Q (3 Probenumfang)	769-866	790-904	9-15

**Ermittelt aus Zugversuch nach DIN 50125*

Tab.2: Chemische Zusammensetzung

Material	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	CEV [%]
S355N,1	0.11	0.38	1.41	0.011	0.030	0.016	0.036	0.36
S355N,2	0.16	0.37	1.43	0.010	0.033	0.013	0.035	0.41
S690Q,1	0.08	0.25	1.19	0.010	0.32	0.30	0.075	0.41
S690Q,2	0.11	0.25	1.19	0.010	0.31	0.31	0.078	0.44

Tab.3: Schneidparameter

Autogenes Brennschneiden	Schneidgeschwindigkeit v_1 (schnell)	Schneidgeschwindigkeit v_2 (langsam)
Brenngasdruck [bar]	0,8	
Druck Schneidsauerstoff [bar]	6	
Vorwärmtemperatur [°C]	20	
Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	420	390
Gewünschte Qualität nach DIN ISO 9013	Q4	Q2

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden an brenngeschnittenen Schulterproben mit einer Blechdicke von 20 mm durchgeführt. Die uniaxiale Probengeometrie ist identische mit der aus vorherigen Arbeiten [6] und in Abb.1 dargestellt. Dabei entspricht 20 mm der Länge des kleinsten Probenquerschnitts mittig der Probe. Zur Untersuchung des Einflusses von konkurrierenden Kerben auf die Schwingfestigkeit von thermischen Schnittkanten wurden in einer Serie je Material Kerben in die Probengeometrie geschnitten um mögliche Prozessinstabilitäten in der Industrie zu reproduzieren. Die resultierenden Einbrandkerben wurden anschließend durch Verwendung des Metallschutzgasschweißens (MAG135) in Wannenlage (PA) reparaturgeschweißt, [10,11]. Die Tiefe der Einbrandkerbe variiert über die Blechdicke. Auf der Oberseite der Probe (Flammen Eintritt) beträgt sie ca. 5 mm und auf der Unterseite der Probe (Flammenaustritt) ca. 3 mm. Anschließend wurden die Schweißnahtüberhöhungen plan geschliffen um die Ursprungsgeometrie im kleinsten Querschnitt wiederherzustellen. Die Position der evtl. vorhandenen Kerbe ist mit in Abb.1 dargestellt.

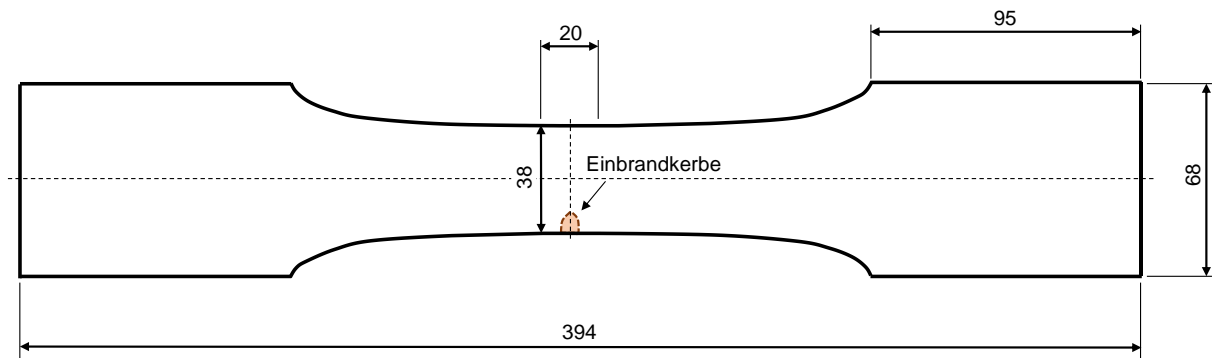


Abb.1: Probengeometrie Schulterprobe inkl. evtl. Einbrandkerbe (in mm)

2.2 Oberflächenqualität der Schnittkante

Zur Bestimmung der Oberflächenqualität wurden makroskopische Topografieaufnahmen aufgenommen, das Oberflächenrauheitsprofil der Schnittflächen sowie die Rechtwinkligkeitstoleranz gemessen und Härtetiefenverläufe aufgezeichnet. In Abb.2 sind die Positionen der Profil- und Qualitätsanalysen der Schnittkante dargestellt. Die Härte wurde sowohl auf dem Querschliff von der Wärmeeinflusszone (WEZ) bis in den Grundwerkstoff (GW), als auch auf der Schnittfläche im Bereich der Kerbe (Schnitt A-A) gemessen.

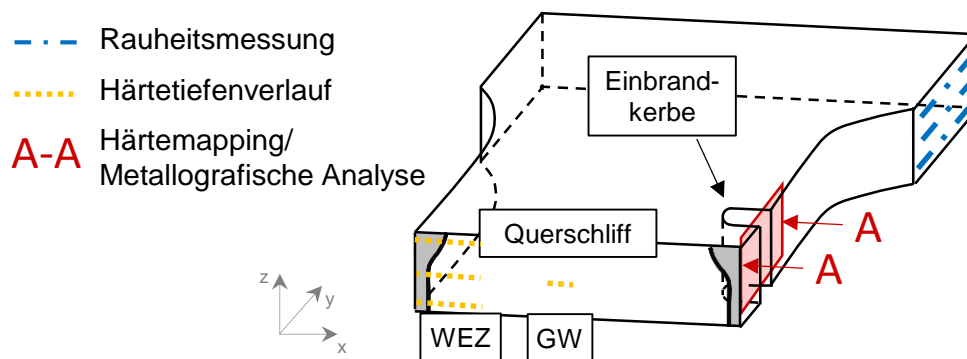


Abb.2: Position der Profil- und Qualitätsanalysen der Oberfläche

Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheitsmessungen wurden in Anlehnung an die ISO 4288 durchgeführt [12]. Mit Hilfe des mobilen Oberflächenmessgeräts MarSurf M 400 wurden die Messungen mittels Tastschnittverfahren über eine Länge von 17.5 mm aufgezeichnet. Die Messungen wurden an drei Positionen über der Blechdicke aufgenommen (oben, mittig, unten), vgl. Abb.2. Dabei wird die maximale Differenz zwischen der Profilspitze

und dem Profital von fünf Einzelmessstrecken gemittelt. Die Bestimmung der gemittelte Rautiefe wird in Abb.3 (links) dargestellt.

Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz

Die Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 9013 bestimmt. Sie ist definiert als Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert des Profils, vgl. Abb.3 (rechts). Die Messungen wurden mithilfe eines Triangulationslasers auf der Schnittkantenoberfläche aufgenommen. Auf jeder Probe wurden fünf Messungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt.

Härte

Zur Bestimmung der Härteverläufe wurden Härtemessungen auf dem Querschliff durchgeführt. Dazu wurden die Proben geschliffen, poliert und mit einer Nitallösung angeätzt. An jeder Probe wurden Vickershärtemessungen (HV0.1) nach DIN ISO 6507 durchgeführt, [13]. Außerdem wurden die Härteverteilungen über der reparaturgeschweißten Kerbe im Schnitt A-A aufgenommen. Die Schnittkanten wurden dazu ebenfalls vorbereitet und geschliffen, um ebene Oberflächen für die Vickershärteprüfung (HV1) zu erhalten. Eine kleine Prüfkraft ist hier nicht zweckmäßig.

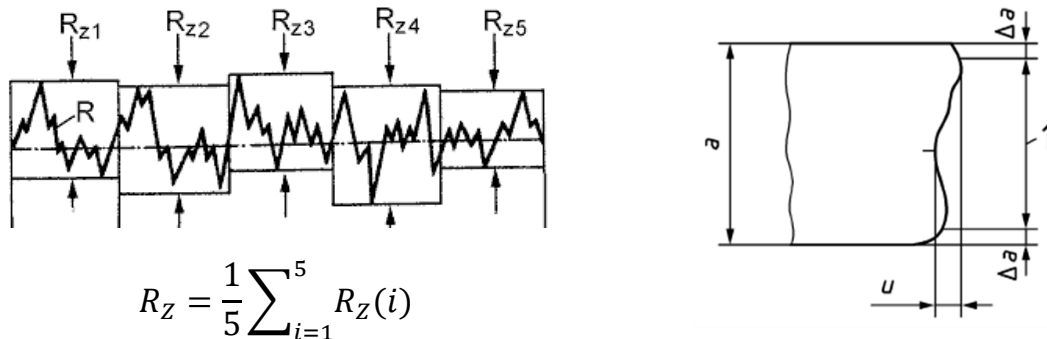


Abb.3: Bestimmung der Oberflächenrauheit sowie Rechtwinkligkeitstoleranz

2.3 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Alle Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden an einer servohydraulischen Prüfmaschine mit konstanter Amplitude (CAL) im Zugschwellbereich bei einem Spannungsverhältnis von $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0.1$ durchgeführt. Die Schwingfestigkeiten wurden für Lastspielzahlen von 1×10^6 bis 5×10^6 zur Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden nach der Perlschnurverfahren bestimmt. Die Versuche wurden ergebnisorientiert durchgeführt und enden mit dem Bruch der Probe. Nach fünf Millionen Lastwechseln wird die Probe als Durchläufer definiert. Die Untersuchungen wurden mithilfe der linearen Regression

nach der DIN 50100 ohne Berücksichtigung von Durchläufern ausgewertet [14]. Das Versuchsprogramm ist in Tab.5 abgebildet.

Tab.5: Versuchsprogramm der Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Nr.	Material	Schneidverfahren	Vorschub [mm/min]	Dicke [mm/min]	Reparaturge- schweißte Kerbe	Proben
1	S355N	Autogenes Brennschneiden	420	20	No	23*
2	S355N	Autogenes Brennschneiden	390	20	Yes	12
3	S355N	Autogenes Brennschneiden	390	20	No	12
4	S690Q	Autogenes Brennschneiden	420	20	No	21*
5	S690Q	Autogenes Brennschneiden	390	20	Yes	12
6	S690Q	Autogenes Brennschneiden	390	20	No	9

*Versuche mit Ergebnissen vorheriger Studien ergänzt [6]

3 Ergebnisse

3.1 Geometrische Qualitätsmerkmale der Schnittkante

Abb. 4 zeigt die makroskopischen Aufnahmen der einzelnen Serien. Visuelle Qualitätsunterschiede sind nur durch größere Schlackeanhaftungen an den Schnittkantenrändern sichtbar.

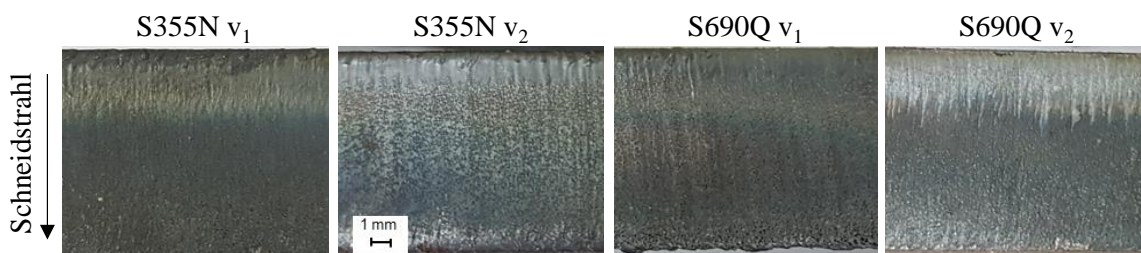


Abb.4: Schnittkantenqualität der Oberfläche der einzelnen Serien

Zur Untersuchung der Schnittkantenoberfläche wurde die gemittelte Rautiefe R_z an drei Positionen über der Blechdicke bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab.6 zusammengefasst. Es wurden gemittelte Rautiefen von $24.3 \mu\text{m}$ – $149 \mu\text{m}$ gemessen. Bei allen Serien wird ein Gradient über der Blechdicke sichtbar. Die geringsten Rautiefen treten dabei am Flammeneintritt auf ($24.3 \mu\text{m}$ – $84.2 \mu\text{m}$), mittlere Werte in der Mitte der Blechdicke ($72.4 \mu\text{m}$ – $129.5 \mu\text{m}$) und die Höchstwerte am Flammenaustritt ($95 \mu\text{m}$ – $149 \mu\text{m}$). Zur Einordnung der Werte in die Qualitätsgruppen der DIN EN ISO 9013 werden die höchsten Rautiefen am Flammenaustritt berücksichtigt. Ein signifikanter Unterschied bei Verwendung der verschiedenen Werkstoffe wird nicht sichtbar. Die Schneidgeschwindigkeit dagegen hat einen Einfluss auf die Qualität der Schnittkantenoberfläche. Eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit resultiert in höheren Schnittkantenqualitäten

und die gemittelte Rautiefe nimmt ab. Eine höhere Qualitätsgruppe bezogen auf die DIN EN ISO 9013 wird jedoch nicht erreicht.

Tab.6: Zusammenfassung der Oberflächenrautiefenmessung

Testserien			Oben (Flam- meneintritt) [μm]	Mitte [μm]	Unten (Flam- menaustritt) [μm]	Qualität nach ISO 9013
1	S355	$V_1 = 420 \text{ mm/min}$	53.2 – 68.2	108.7 – 124.3	121 – 149	4
2, 3	S355	$V_2 = 390 \text{ mm/min}$	24.3 – 44.5	72.4 – 103.2	107.4 – 122.2	4
4	S690	$V_1 = 420 \text{ mm/min}$	50.9 – 84.2	94.9 – 129.5	117.6 – 145.2	4
5, 6	S690	$V_2 = 390 \text{ mm/min}$	28.6 – 43.2	74.7 – 103.6	95 – 114.6	4

Neben den Rautiefenmessungen wurde auch die Rechtwinkligkeit der Schnittkante nach DIN EN ISO 9013 bestimmt. Im Balkendiagramm, Abb.5, ist der charakteristische Kennwert u für die verschiedenen Serien gegenübergestellt. Außerdem sind die Grenzwerte für die einzelnen Qualitätsgruppen für eine Blechdicke von 20 mm mit eingezeichnet. Die Rechtwinkligkeit der Proben zeigt die gleiche Tendenz wie die gemittelte Rautiefe. Serie 1 (S355, $u = 0.65 \mu\text{m}$) und 4 (S690, $u = 0.36 \mu\text{m}$), die mit höherer Schneidgeschwindigkeit geschnitten wurden, zeigen höhere u Werte im Vergleich zu Serie 2 (S355, $u = 0.2 \mu\text{m}$) und Serie 5 (S690, $u = 0.18 \mu\text{m}$). Auch die resultierenden Qualitätsgruppen unterscheiden sich. Für hohe Vorschubgeschwindigkeiten wird der S355N in Qualitätsgruppe 4 und der S690Q in Qualitätsgruppe 3 eingeordnet. Eine Reduzierung der Schneidgeschwindigkeit minimiert auch die Rechtwinkligkeitsabweichung und die Qualität steigt. Beide Werkstoffe werden bei reduzierter Vorschubgeschwindigkeit in Qualitätsgruppe 2 der DIN EN ISO 9013 eingestuft.

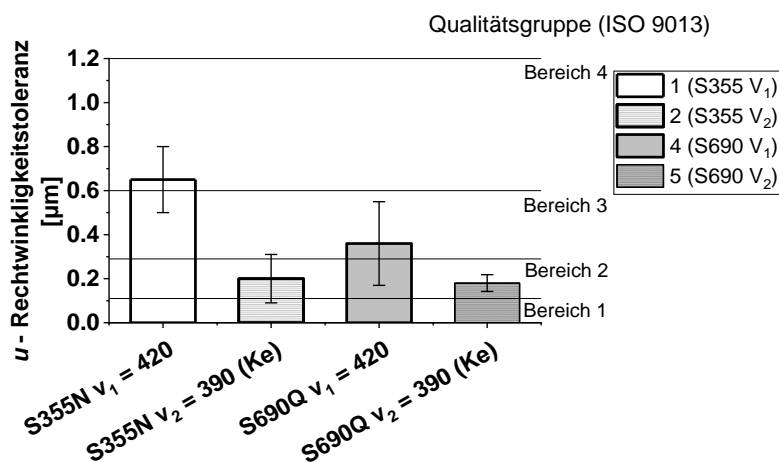


Abb.5: Rechtwinkligkeitstoleranz der verschiedenen Schnittkanten

3.2 Härtemessungen und metallografische Analyse

Die unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten und die damit einhergehenden Abkühlgeschwindigkeiten beeinflussen die Randschicht der Schnittkante. Es ergeben sich unterschiedlich breite Wärmeeinflusszonen und in Verbindung mit dem Kohlenstoffgehalt des Materials kann dies zu hohen Härten an der Randschicht resultieren. Zur Bestimmung der Maximalhärte an der Schnittkante sowie Beurteilung möglicher Unterschiede über der Dicke werden je Serie drei Härtespuren auf dem Querschliff aufgenommen, (oben, mittig, unten).

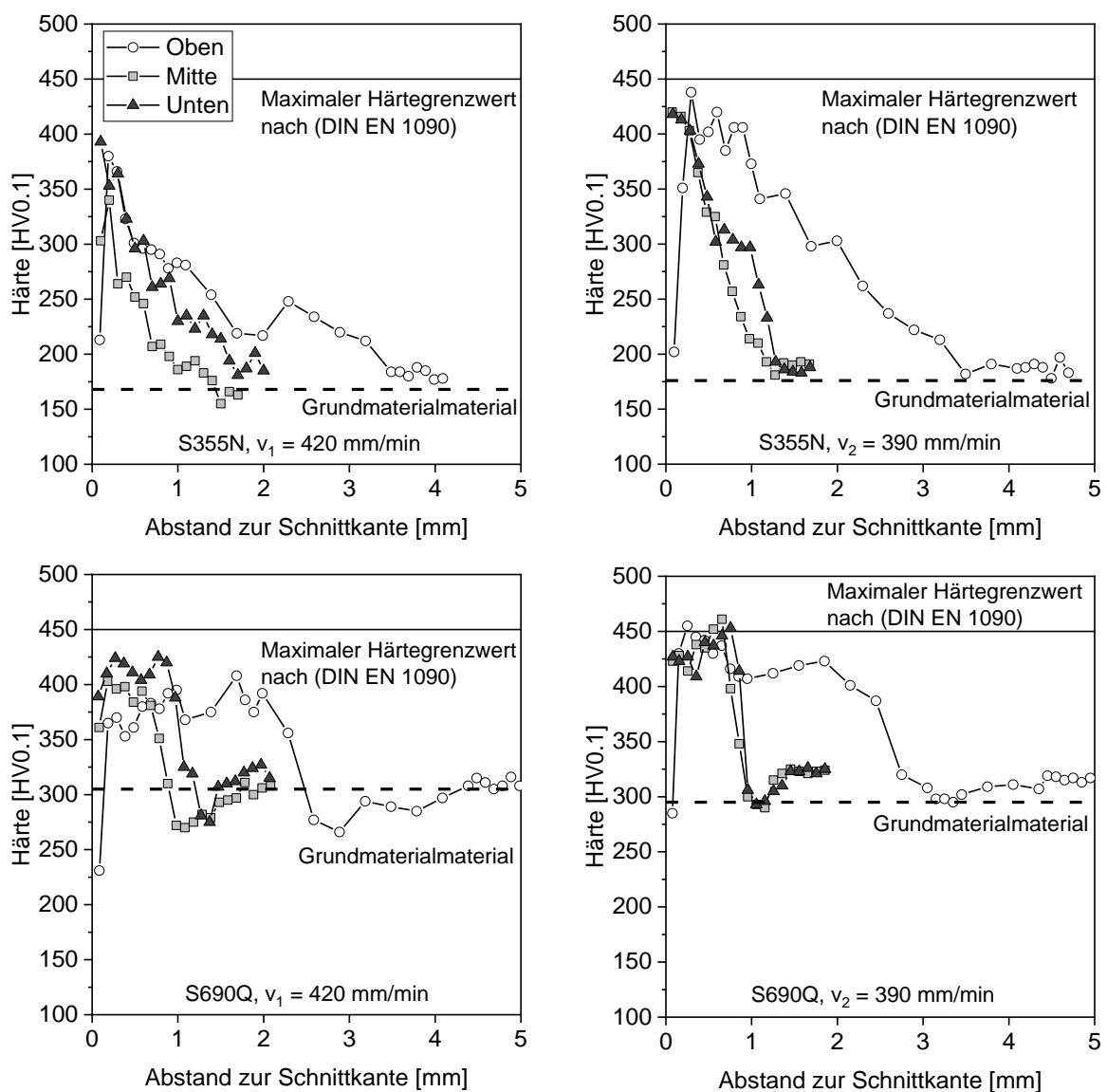


Abb.6: Härtetiefenverläufe am Querschliff der Schnittkanten oben, mittig und unten

Abb. 6 zeigt die Härtemessungen der einzelnen Serien mit variierender Materialgüte sowie Vorschubgeschwindigkeit. Der maximale Härtegrenzwert der DIN EN 1090 für Materialgüten >S460 ist außerdem mit eingezeichnet. Die Messungen wurden bis zum Erreichen der Grundwerkstoffhärte aufgetragen. Der S355N hat eine Grundwerkstoffhärte von ca. 170 HV0.1 und der S690Q von etwa 300 HV0.1. Basierend auf den Härtemessungen variiert die WEZ von 1 mm – 3 mm je nach Grundmaterial und Lage der Härtespur. Auf der Probenoberseite ist der Wärmeeintrag höher und es ergeben sich breitere Wärmeeinflusszonen. Die Maximalhärte beim S355N beträgt 438 HV0.1 und beim S690 461 HV0.1 Das entspricht einer Aufhärtung von 50% - 150% des Grundwerkstoffs. Der maximale Härtegrenzwert der DIN EN 1090 wird nur leicht überschritten.

Zur Bestimmung der Wärmeeinflusszone und des Härtegradienten verursacht durch den Reparaturschweißprozess wurden für beide Werkstoffe Härtemappings über dem Ausschnitt A-A direkt über der Kerbe aufgenommen. Um die maximalen Härtewerte besser miteinander vergleichen zu können wird außerdem ein Härteverlauf auf der Schnittkante über der Schweißnaht 1 mm unter der Oberfläche beider Werkstoffe aufgenommen, Abb. 7 links. Die unterschiedlichen Grundwerkstoffhärten werden sichtbar und sind mit den Werten auf dem Querschliff vergleichbar. Auch die Schweißnaht und die Breite der Wärmeeinflusszone ist erkennbar. Die WEZ ist beim S355N etwa 9 mm und beim S690Q 14 mm breit. Die maximale Härte in der WEZ der reparaturgeschweißten Kerbe liegt bei 436 HV1 (S355N) und 449 HV1 (S690Q). Der Härtegrenzwert der DIN EN 1090 wird nicht überschritten und ist damit auch geringer als an der Schnittkante, vgl. Abb. 6.

Durch die Reparaturschweißungen mit Zusatzdraht können Poren und Fehlstellen in der Schweißnaht auftreten. Alle Proben wurden metallografisch analysiert um Fehlstellen zu identifizieren und diese im Anschluss mit den Ergebnissen der Schwingfestigkeitsversuche sowie den Rissausgangsorten zu bewerten. Es zeigte sich, dass 6 von 24 Proben (25%) Poren mit einem Durchmesser von bis zu 0.6 mm aufwiesen.

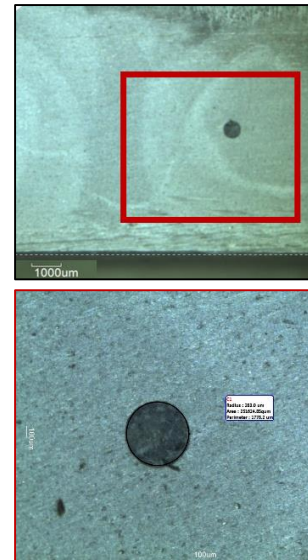
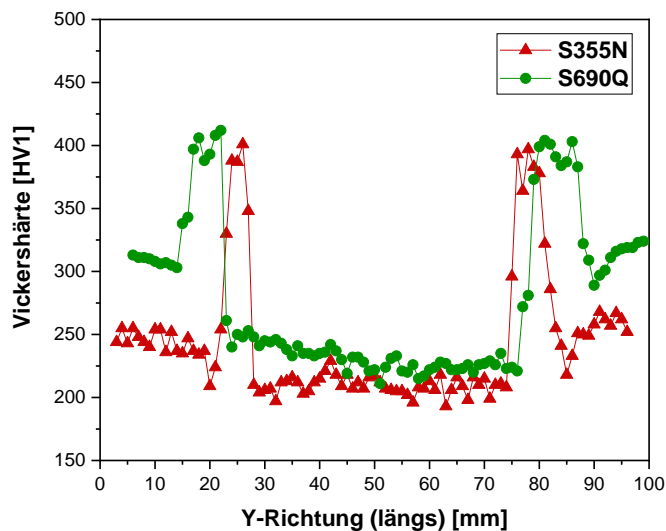


Abb.7: Härtetiefenverläufe über der reparaturgeschweißten Kerbe (links), Pore in der Schweißnaht (rechts)

3.3 Schwingfestigkeitsergebnisse

Die Schwingfestigkeitsergebnisse sind in Tab.7 zusammengefasst. Dargestellt ist das verwendete Spannungsverhältnis R , die Anzahl der verwendeten Proben je Serie inklusiver der Durchläufer, die Neigung k der Wöhlerline (WL), der Lageparameter $\log C$, die Standardabweichung Stab. , die Schwingfestigkeit bei 2 Millionen Lastwechseln und eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 50\%$, sowie von $P_{\bar{U}} = 97.7\%$ umgerechnet auf ein Spannungsverhältnis von $R = 0.5$ und die Rissausgangsorte (Schnittfläche/Kante/Walzoberfläche). Die Analyse der Wöhlerlinienfunktion: $\log N = \log C - k \log \Delta \sigma$ basiert auf linearer Regression in Richtung der Lastspielzahl N . Die Ergebnisse wurden mit dem Korrekturfaktor $f(R) = 1.15$ nach Hobbacher [15] auf das effektive Spannungsverhältnis angepasst.

Tab.7: Zusammenfassung der Schwingfestigkeitsergebnisse

Testserien	Spannungsverhältnis R	Anzahl Proben (Durchläufer)	Neigung k	Log C	Stab	$\Delta \sigma$ (2E6) 50%	$\Delta \sigma$ (2E6) 97.7%, $R = 0.5$	Rissausgang
								S-C-W*
S355N v_1	0.1	23(2)	4.4	16.3	0.12	200	146	2-18-1
S355N v_2	0.1	12(1)	6.8	22.5	0.14	248	191	1(1)-7-
S355N v_2	0.1	12(1)	6.0	20.7	0.15	249	185	2-4-6
S690Q v_1	0.1	21(2)	3.0	13.2	0.1	184	134	4-17-0
S690Q v_2	0.1	12(2)	3.8	15.4	0.13	239	169	0-7-3
S690Q v_2	0.1	9(1)	4.3	16.5	0.04	240	195	3-4-1

*S: Schnittfläche, C: Kante, W: Walzoberfläche – (x): Rissausgang in reparaturgeschweißter Kerbe

Das Versagensverhalten eines Werkstoffs oder eines Bauteils und damit die Schwingfestigkeit werden mit Hilfe der Wöhlerlinie ausgewertet und dargestellt. Abb. 8 zeigt die Wöhlerlinien der Proben untergliedert nach der Materialgüte. Dabei werden die Schneidgeschwindigkeiten sowie die Serie mit der verschleißten Kerbe miteinander verglichen. Aufgetragen ist die Spannungsschwingbreite über der Lastspielzahl. Außerdem sind vergleichend die Verläufe der zuständigen FAT 125/140 nach den IIW-Empfehlungen aufgetragen, die für Bauteilauslegungen herangezogen werden [15].

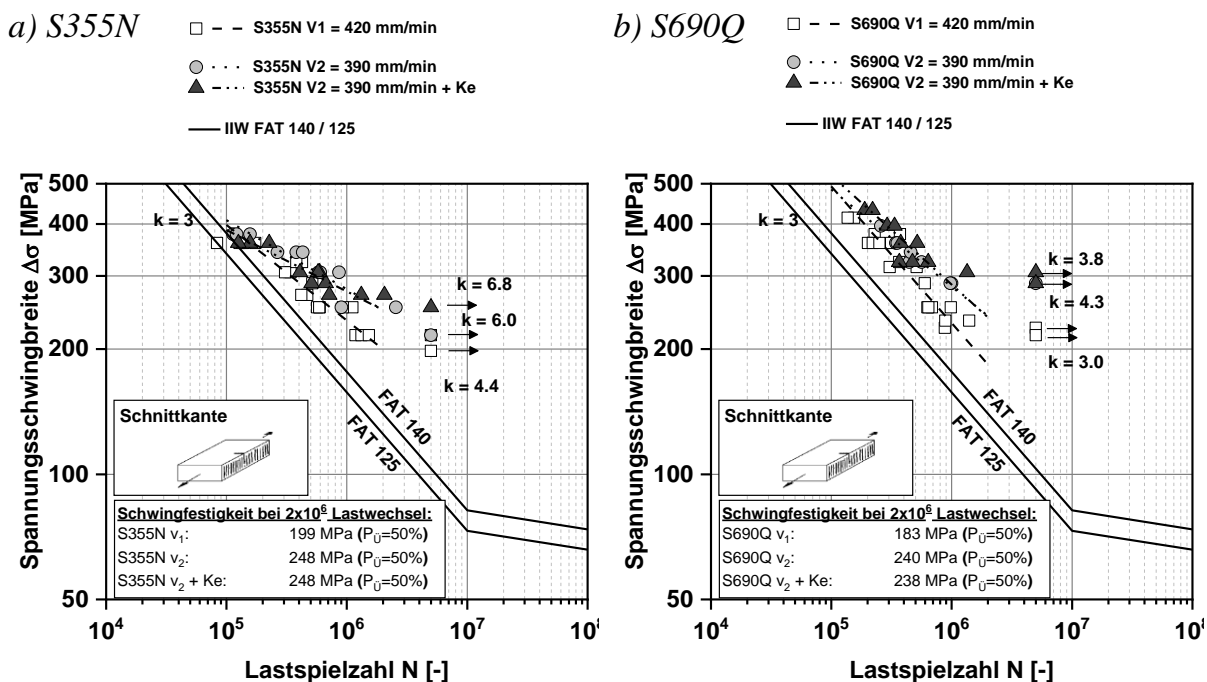


Abb. 8: Graphische Darstellung der Schwingfestigkeitsergebnisse in Form von Wöhlerlinien der autogen geschnittenen Proben aus a) S355N, b) S690Q

Die Auswertung liefert eine WL mit $P_U = 50\%$. Die charakteristische Neigung k der Kurve ist jeweils mit angegeben. Unten links sind die Schwingfestigkeiten bei 2 Millionen Lastwechseln mit $P_U = 50\%$ dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sind die Ergebnisse des S355N und auf der rechten Seite des S690Q dargestellt. Die Serie S355N v_1 weist eine Schwingfestigkeit ($P_U=50\%$) von $\Delta\sigma = 199$ MPa mit einer Neigung von $k = 4.4$ auf. Eine Verbesserung der Ergebnisse durch Reduzierung der Schneidgeschwindigkeit wird in erster Linie bei geringeren Spannungsamplituden sichtbar. Die Schwingfestigkeit verbessert sich um ca. 25% auf $\Delta\sigma = 248$ MPa bei einer Steigung von $k = 6.0$. Eine signifikante Reduzierung der Schwingfestigkeit bei der Serie

mit reparaturgeschweißter Kerbe ist nicht sichtbar. Es zeigt sich ein vergleichbares Schwingfestigkeitsergebnis von $\Delta\sigma = 248 \text{ MPa}$ und einer Neigung von $k = 6.8$.

Die Ergebnisse des S690Q auf der rechten Seite der Abbildung geben ein ähnliches Bild wieder. Die Schwingfestigkeit des S690Q v_1 liegt bei $\Delta\sigma = 183 \text{ MPa}$ ($P_{\bar{U}}50\%$) mit einer Neigung von $k = 3.0$. Die Serie mit reduzierte Schneidgeschwindigkeit von $v_2 = 390 \text{ mm/min}$ zeigt eine Verbesserung der Schwingfestigkeit von ca. 31 % auf $\Delta\sigma = 240 \text{ MPa}$, Neigung $k = 4.3$. Auch hier erreicht die Serie mit reparaturgeschweißter Kerbe vergleichbar hohe Schwingfestigkeitsergebnisse von $\Delta\sigma = 238 \text{ MPa}$ (Neigung $k = 3.8$) und es wird kein signifikanter Qualitätsverlust in Bezug auf die dynamische Festigkeit sichtbar.

4 Diskussion

In diesem Beitrag wird experimentell der Einfluss von reparaturgeschweißten Kerben an freien thermischen Schnittkanten auf deren dynamische Festigkeit untersucht. Dazu wurden Schwingfestigkeitsversuche an autogengeschnittenen Kanten mit konstanter Amplitude bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0.1$ durchgeführt. Zwei unterschiedliche Materialien wurden dabei berücksichtigt und die Qualität der Schnittkanten wurde durch Änderung der Schneidgeschwindigkeit variiert. Zur Erzeugung der konkurrierenden Kerbe wurden zwei Serien absichtlich mit Fehlern geschnitten, um Prozessstörungen in der Industrie zu reproduzieren. Die resultierenden Einbrandkerben wurden anschließend durch Verwendung des Metalschutzgasschweißens (MAG135) in Wanneneinlage (PA) reparaturgeschweißt.

Zur Bestimmung der geometrischen Qualität der Schnittkanten wurde die Rauheit und die Rechtwinkligkeitstoleranz nach ISO 9013 bestimmt. Es zeigen sich Qualitätsunterschiede durch die Veränderung der Schneidgeschwindigkeit. Die Rauheitswerte werden dabei alle in die Qualitätsgruppe 4 eingeordnet. Durch Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit reduziert sich auch die Rauheit und die Qualität steigt an auch wenn die nächsthöhere Qualitätsgruppe nicht erreicht wird. Die Ergebnisse der Rechtwinkligkeitstoleranz zeigen die gleiche Tendenz. Eine geringere Schneidgeschwindigkeit reduziert die Rechtwinkligkeitstoleranz und die Qualität steigt für beide Materialien in die Qualitätsgruppe 2.

Die Härtemessungen sowohl am Querschliff als auch über der reparaturgeschweißten Kerbe entsprechen überwiegend den Härtegrenzwerten der DIN EN 1090. Nur 3 Härtewerte des S690Q v_2 überschreiten den Grenzwert um 2.5 %. Die höheren Härtewerte

können mit der geringeren Prüfkraft im Vergleich zur Norm erklärt werden. Vergangene Studien zeigen, dass die Verwendung von HV10 in den Bereichen nicht zweckmäßig ist [16]. Die Härte an der reparaturgeschweißten Kerbe ist vergleichbar oder geringer als an der thermischen Schnittkante. Ein vorzeitiges Versagen in dem Bereich aufgrund von metallurgischen Kerben wird hier nicht erwartet.

Die gezeigten Schwingfestigkeitsergebnisse können nicht direkt mit den IIW FAT Klassen verglichen werden. Dazu müssen die Daten zuerst auf ein Spannungsverhältnis von $R = 0.5$ korrigiert und auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97.7 % angepasst werden [15]. In Abb. 9 werden die Schwingfestigkeitsergebnisse $\Delta\sigma$ (2E6) 97.7%, $m = \text{var.}$, $R_{\text{cor}} = 0.5$ gegenübergestellt. Alle Serien erreichen die FAT 125. Die Schneidgeschwindigkeit beeinflusst die Rauheit sowie die Rechtwinkligkeitstoleranz an der Schnittkante. Beide Werte nehmen bei geringerer Schneidgeschwindigkeit ab und es resultieren höhere Schwingfestigkeitsergebnisse bei allen untersuchten Serien. Kerbkritische Defekte an der Schnittkante, die zum Riss führen können, werden kleiner und beide Serien mit reduzierte Vorschubgeschwindigkeit überschreiten die FAT 160, welche für fehlerfreie Grundwerkstoffe gilt.

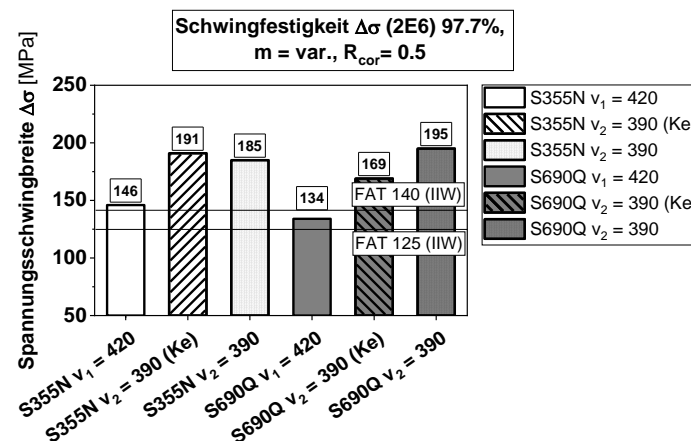


Abb.9: Schwingfestigkeit bei $N = 2$ Mio und einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{U}} = 97,7 \%$ mit korrigiertem Spannungsverhältnis $R = 0.5$

Die reparaturgeschweißten Serien im kritischen Querschnitt in diesem Beitrag erfüllen die Anforderungen der IIW Empfehlungen und zeigen keine Schwingfestigkeitsreduzierung durch Defekte, Proben oder metallurgische Kerben an der Schnittkante. Die Bruchflächenanalyse zeigt, dass bei drei Proben des S355N die Fehlstellen in der Schweißnaht

als kritische Defekte bestimmt wurden und für die Rissinitiierung entscheidend waren, es jedoch zu keiner Reduzierung der Schwingfestigkeit bei dieser Serie kommt.

5 Zusammenfassung

In dieser Studie wurden Schwingfestigkeitsuntersuchungen an unterschiedlichen Serien durchgeführt um den Einfluss von konkurrierenden Kerben an der Schnittkante zu analysieren. Dazu wurden 20 mm dicke Proben aus S355N sowie S690Q bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0.1$ getestet. Die Proben wurden autogen geschnitten und bei zwei Serien vorsätzlich Kerben integriert um Prozessstörungen zu reproduzieren. Diese Fehlstellen wurden im Anschluss mit Hilfe des Metallschutzgasschweißens reparaturgeschweißt.

Die Serien mit reparaturgeschweißter Kerbe erfüllen die Anforderungen der IIW Empfehlungen und zeigen keine Schwingfestigkeitsreduzierung infolge von Poren in der reparaturgeschweißten Zone. In Bezug auf die dynamische Festigkeit von freien Schnittkanten kann das Metallschutzgasschweißen zur Reparatur von Fehlstellen, hervorgerufen durch Prozessstörungen, eingesetzt werden. Die Schweißnahtüberhöhungen müssen dabei plangeschliffen werden um weitere Kerben zu vermeiden und die Ursprungsgeometrie wiederherzustellen. Außerdem sollte eine visuelle Kontrolle der reparaturgeschweißten Zone erfolgen, um großen Poren zu identifizieren.

6 Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) im Vorhaben 18.789N „Bedeutung der Qualitätsmerkmale freier Schnittkanten nach DIN EN 1090 für deren Schwingfestigkeit unter Berücksichtigung von Eigenspannungen“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Hierfür sei herzlich gedankt.

6 Literatur

- [1] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure, 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin: Springer-Verlag (2007).

- [2] Läßle, V.: Einführung in die Festigkeitslehre: Lehr- und Übungsbuch, 4., aktualisierte Auflage, Wiesbaden: Springer-Fachmedien (2006).
- [3] Nussbaumer, A.; Günther, H.-P.: Steel construction calendar 2006: Basics and explanation of the new fatigue checks according to Eurocode 3, 2006.
- [4] Sperle J.-O.: „Influence of parent metal strength on the fatigue strength of parent material with machined and thermally cut edges. IIW Document XIII-2174-07“, International Institute of Welding, Paris, 2007.
- [5] Cicero, S.; García, T.; Álvarez, J.A.; et al.: Fatigue behaviour of structural steels with oxy-fuel, plasma and laser cut straight edges. Definition of Eurocode 3 FAT classes, Engineering Structures 111, S. 152–161, 2016.
- [6] Diekhoff, P.; Hensel, J.; Nitschke-Pagel, Th.; Dilger, K.: Fatigue strength of thermal cut edges – Influence of ISO 9013 quality groups, Welding in the World 63(2):349–363, 2019.
- [7] Diekhoff, P.; Hensel, J.; Nitschke-Pagel, Th.; Dilger, K.: Investigation on fatigue strength of cut edges produced by various cutting methods for high strength steels, Welding in the World 64:545–561, 2020.
- [8] DIN EN 1090-2:2011: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken.
- [9] DIN EN ISO 9013:2015: Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualität.
- [10] AWS A3.0M/A3.0: Standard Welding Terms and Definitions Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying, 2010.
- [11] DIN EN ISO 6947: Schweißen und verwandte Prozesse - Schweißpositionen (ISO 6947:2019), 2019.
- [12] DIN EN ISO 4288:1997: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.
- [13] DIN EN ISO 6507: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018), 2018.

- [14] DIN 50100:2015 Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile.
- [15] Hobbacher, A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Springer Verlag, Heidelberg 2016.
- [16] Berg, J.; Stranghöner, N.; Gorbachov, A.: Influence of thermal cutting methods on the hardness of free edge regions of structural steel, Duisburg, Forschungsbericht, 2012.

Autorenanschrift

Paul Diekhoff

Technische Universität Clausthal
Institut für Füge- und Schweißtechnik
Langer Kamp 8
38106 Braunschweig

Telefon: 0531-391 95514

Telefax: 0531-39195599

E-Mail: p.diekhoff@tu-bs.de